

高橋義朗

京都大学大学院理学研究科・教授

## 超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発

### §1. 研究実施の概要

本年度は、各グループにおいて着実に進展があった。まず、京大グループでは、Yb 原子光格子実験をNTTグループの理論と比較することにより、ボース・フェルミ混合モット状態の様々な量子相を同定すると同時に、光格子導入時における断熱冷却・加熱の効果を明らかにした。これは京大-NTT 間の連携研究の成果である。また、単一光格子点操作・検出に向けて、NICT グループと協力し数 100Hz 程度の線幅の光源開発に成功した。これは、京大-NICT 間の連携研究の成果である。これをもとに、ほぼ光格子間隔程度の空間分解能を得ることに成功した。また、実時間量子フィードバック制御により決定論的スピンスクイズド状態を生成することに成功した。さらに、Yb 原子とLi原子の同時量子縮退に成功した。

当初の計画では、ヘルツおよびサブヘルツの線幅を実現する予定であった。これを実現すべく、今後も レーザーのさらなる狭線幅化を行うと同時に、それをホールバーニングなどの超高分解能分光により確認する予定である。また、最近の理論計算から YbLi 分子の電気双極子モーメントが非常に小さいことが判明したため、極性分子生成は非常に困難であることが分かったが、Yb と Li の混合系は近藤格子モデルの量子シミュレーターや反強磁性実現などに非常に有望であることがわかったため、この方向で研究を推進したい。また、2次元系の単一光格子点操作・検出、スピンスクイズドの改善と時計遷移への転写、を行っていく予定である。

NICT グループでは、開発を進めている  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計について線幅 12Hz で分光をすることが可能となり、原子時計動作を開始し、1000s以上の平均時間では $10^{-16}$  乗位の安定度に到達していることが予見される。また、熱雑音の影響を相対的に減少させるための 30cm 共振器を設計し、航空電子工業のグループと協力して共振器を製作した。また、新しいアクティブ除振方式を考案し、その原理検証に成功した。

日本航空電子グループでは、超狭線幅光源の実現を目指した低損失誘電体多層膜鏡の開発を進め、1064nm 用ミラーの反射率として 99.99975%が得られ目標値を上回り、最終目標を達成する指針を得ることができた。波長 698nm では、反射率 99.99941%が得られ、改善することができた。

NTTグループでは前述の京大グループとの共同研究に加えて、反強磁性転移温度の導出、反強磁性磁気秩序に対する簡便な観測法の提案、三成分フェルミ原子系が示す新奇なモット絶縁体転移、などの量子磁性理論の研究を先駆けて行った。一方、誤り耐性のある量子計算方式を見出すとともに、量子計算に有用なクラスター状態の高効率生成方法を数値計算により明らかにした。

## § 2. 研究実施体制

### (1)「京大」グループ

① 研究分担グループ長:高橋義朗 (京都大学理学研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・Yb 原子励起用高安定光源の開発
- ・高安定磁場勾配・光格子一体型装置の開発
- ・光格子中冷却原子のスピンスクイジング技術の開発
- ・YbLi 極性分子に向けたレーザー冷却

### (2)「NICT」グループ

① 研究分担グループ長:井戸 哲也 (NICT 光・時空標準グループ、主任研究員)

#### ② 研究項目

- ・Sr 光格子時計の開発
- ・30cm 長光共振器の開発
- ・光共振器におけるアクティブ光学除振方式による除振法の研究

### (3)「航空電子」グループ

① 研究分担グループ長:江藤 和幸(日本航空電子工業株式会社 商品開発センター商品開発部 UV 技術シニアマネージャー)

#### ② 研究項目

- ・超狭線幅光源の実現を目指した低損失誘電体多層膜鏡の開発

### (4)「NTT」グループ

① 研究分担グループ長:(山下 眞 (NTT 物性科学基礎研究所、主任研究員))

#### ② 研究項目

- ・超狭線幅光源を用いた光格子中冷却原子の量子状態制御に関する新たな理論の構築
- ・光格子量子コンピュータ実現に向けた冷却原子の多量子ビット状態(クラスター状態)の生成方法ならびにその量子操作方法の提案
- ・光格子時計の超高精度化に向けた冷却原子のスピンスクイジング制御を利用した新たな測定方法の提案

### §3. 研究実施内容

(文中の引用番号等は(4-1)に対応する)

#### 京大グループ

Yb 原子光格子実験では、これまでにない強相関量子多体系として、ボース・フェルミ混合モット状態を実現し、NTTグループの理論と比較することにより、「混合 Mott 状態」、「相分離 Mott 絶縁体」「複合粒子生成」「モット相の融解」など、ボース・フェルミ混合モット状態の様々な量子相を同定すると同時に、光格子導入時において、斥力系での断熱冷却、引力系での断熱加熱、の効果を明らかにした。これは京大-NTT 間の連携研究の成果である。さらに、新規な  $SU(2) \times SU(6)$  対称性をもつフェルミ気体を実現し<sup>(KU-1)</sup>、原子間相互作用を高空間分解能で変調する技術の開発に成功<sup>(KU-4)</sup>するなどの成果が得られた。

また、単一光格子点操作・検出に向けて、NICT グループと協力し 1014nm 光源に関しては、数 100Hz 程度の線幅の光源開発に成功した。また、507nm 光に対しては大きなファイバー由来の周波数ノイズがあることを突き止めた。これらは、京大-NICT 間の連携研究の成果である。当初の計画では、ヘルツおよびサブヘルツの線幅を実現する予定であったので、今後もレーザーのさらなる狭線幅化を行うと同時に、それをホールバーニングなどの超高分解能分光により確認する予定である。また、薄型ガラスセル中で BEC を 3 次元光格子に導入し、一次元の磁場勾配を印加して、ほぼ光格子間隔程度の空間分解能を得ることに成功した。

また、ファラデー回転相互作用によりスクイズした  $^{171}\text{Yb}$  原子の核スピン集団を、さらに、円偏光の光を照射することにより、実時間量子フィードバック制御を実現し、これにより測定結果によらない決定論的スピンスクイズド状態を生成することに成功した。

さらに、Yb 原子とLi原子からなる新規なスピン自由度を持った超低温極性分子生成のための重要なステップである、Yb 原子とLi原子の同時量子縮退の生成を、光トラップ中での共同蒸発冷却により世界に先駆けて実現した。Yb と Li の混合系は近藤格子モデルの量子シミュレーターや反強磁性実現などに非常に有望であることがわかったため、この方向での課題も新たに付け加えて研究を推進したい。

このほかにも、量子気体の高分解能分光の成功<sup>(KU-3)</sup>、非アーベル群のトポロジカルオーダーに関する理論提案<sup>(KU-2)</sup>などの成果を得ることができた。

#### NICTグループ

##### $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計の開発

開発を進めている  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計については、前年度に 1kHz 程度の線幅で時計遷移を分光していたが、磁場の補正等によって原子系の周波数シフト要因を抑制し、また原子のスピン偏極及びクロックレーザーの線幅のさらなる狭窄化によって、線幅 12Hz で時計遷移の分光をすることが可能となった。続いてクロックレーザーを時計遷移に安定化することにも成功し、原子時計動作を開始した。光格子時計が供給する光周波数の安定度については、NICT 内にある水素メーザー及

びクライオジェニックサファイアオッシレータ (CSO) との比較によって調べた結果、 $\sigma(\tau) = 2 \times 10^{-14} / \tau^{1/2}$  となり、1000s以上の平均時間では16 乗台に到達していることが予見される。そこで、本年度安定度及び確度が向上したカルシウムイオン単一イオントラップ時計との間で直接比較を行い、相対安定度として 1000 秒程度で 16 乗台に入ることを確認した。

### 30cm 長光共振器の開発

現在光原子時計の短期の安定度はクロックレーザーの周波数ノイズのために  $1 \times 10^{-15}$  程度に制限されているが、この周波数ノイズはレーザーを安定化する光共振器の共振器長が熱雑音によって振動することから来ている。昨年度はこの熱雑音の影響を相対的に減少させるために一般的な 10cm よりも長い共振器を設計し、この設計について論文発表を今年度行うと同時に (NICT-1) チームメンバーである航空電子工業のグループと協力して共振器を製作した。製作の際は、零膨張ガラスのヤング率・ポアソン比等のパラメータをガラス材メーカーが実際に使用する材料で測定し、その値を有限要素法による測定に取り込む等、シミュレーション結果が実際に再現するよういくつかの工夫のもとに行った。

### アクティブ光学除振方式の開発

一般に除振台は空気バネ等によるパッシブ除振台と、振動を加速度センサで感知して台に逆向きに打ち消す振動を与えてキャンセルするアクティブ除振台がある。ここではいずれの方式も 1Hz 以下の低振動周波数をキャンセルするためには非常に大きな装置を必要とする。これに対してアクティブ方式においてセンサからの加速度信号に呼応して光周波数をシフトさせて光周波数において除振する方式を考案し、その原理検証に成功した。

## 航空電子グループ

### 超狭線幅光源の実現を目指した低損失誘電体多層膜鏡の開発

超狭線幅光源の実現のためには超高反射ミラー(最終目標 反射率 99.9997%)が必要とされている。よく知られているように反射率=1-透過率-損失(散乱損失+吸収損失)であるため、反射率を極限まで高めるためには、損失を極限まで低減することが必要となる。ミラーは酸化物誘電体多層膜からなっている。したがって吸収損失については、酸化物薄膜の形成過程においてできる欠陥や不純物が原因となる。特に酸素欠損や溶存酸素が 700nm 近傍に吸収帯を作ることが知られているので、今年度はこれらに着目し改善実験を進めた。図1に改善後のミラーの反射率をリングダウン法を用いて測定した結果を示す。その結果波長 698nm では、昨年度反射率が 99.999%だったのに対し 99.99941%が得られ、改善が進んでいることがわかる。また、酸素欠損や溶存酸素による光吸収は波長依存性があるため、1064nm 用ミラーを作製しリングダウン法を用いて反射率を測定した結果を図 2 に示す。反射率として 99.99975%が得られており、1064nm の単一波長では目標値を上回り、最終目標を達成する指針を得ることができた。

またラマン分析を実施した結果、多層膜ミラーの低屈折率材料である SiO<sub>2</sub> 膜からは O<sub>2</sub> 分子(ラ

マンシフト  $1555\text{cm}^{-1}$ )のピークが検出されたが、一方の高屈折率材料である  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  膜からは  $\text{O}_2$  は検出されなかった。この結果を踏まえ来年度以降、さらなる低損失化を図るための改善実験を行っていく。

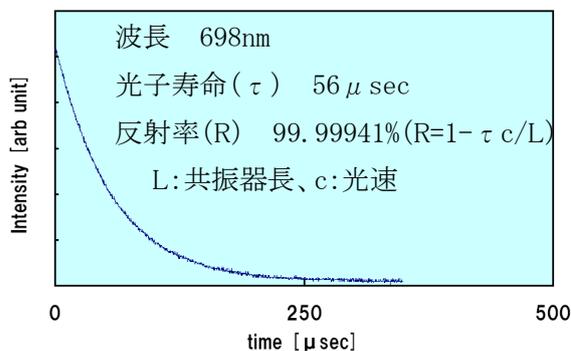


図1 波長698nm用ミラーのリングダウン法による反射率測定結果

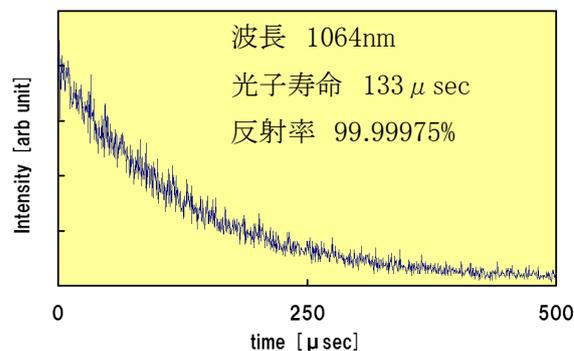


図2 波長1064nm用ミラーのリングダウン法による反射率測定結果

## NTTグループ

NTT グループでは京大グループによるボース・フェルミ混合気体の実験を対象とした理論解析を行った。グッツヴィラー近似に基づく計算手法を有限温度に拡張することにより、この系が示す多様な量子相転移現象を定量的に説明することに成功した。加えて、今後重要となる冷却フェルミ原子気体の量子磁性に関する理論研究も実験に先駆けて行い、一連の成果を得た。まず、自己エネルギー汎関数法を用いて反強磁性転移温度の精密な導出に成功し (NTT-1)、さらに標準的な実験技術である **Time-of-flight** 法とフェッシュバハ共鳴を組み合わせた反強磁性磁気秩序に対する簡便な観測法の理論提案を行った (NTT-2)。特に、後者は系の並進対称性の破れを原子のダイナミクスを通して測定するものであり、これまでになく全く新しい観測方法となっている。またこれと並行して、自己エネルギー汎関数法を用いて、三成分フェルミ原子系が極低温で新奇なモット絶縁体転移を示すことを理論的に明らかにした (NTT-3, 4)。

一方で、光格子中の冷却原子を量子計算機へ応用するための基礎理論も進展した。近年注目されているトポロジカル量子計算ではこれまで誤り確率の低い量子ゲートが不可欠であると考えられていたが、誤り確率が非常に高い量子ゲートを用いても量子計算が可能となるような誤り耐性のある量子計算方式を見出した。また実際の物理系に近い理論解析としては、光超格子ポテンシャルに時間的な変調を加えることで、トラップされた冷却フェルミ原子のスピンの高い効率で量子計算に有用なクラスター状態に遷移することを詳細な数値計算により明らかにした。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

- [KU-1] Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Seiji Sugawa, Rekishu Yamazaki, Takuya Tsujimoto, Ryo Murakami, and Yoshiro Takahashi, “Realization of a  $SU(2)*SU(6)$  System of Fermions in a Cold Atomic Gas”, *Phys. Rev. Lett* 105,190401-1-4,2010 (DOI:10.1103/PhysRevLett.105.190401)
- [KU-2] Masatoshi Sato, Yoshiro Takahashi, and Satoshi Fujimoto, “Non-Abelian topological orders and Majorana fermions in spin-singlet superconductors”, *Phys. Rev. B* 82,134521-1-28,2010(DOI: 10.1103/PhysRevB.82.134521)
- [KU-3] A. Yamaguchi, S. Uetake, S Kato, H. Ito, and Y. Takahashi, “High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole transition”, *New J.Phys.*12 103001-1-13,2010 (DOI:10.1088/1367-2630/12/10/103001)
- [KU-4] Rekishu Yamazaki, Shintaro Taie, Seiji Sugawa, Yoshiro Takahashi, “Submicron Spatial Modulation of an Interatomic Interaction in a Bose-Einstein Condensate” *Phys. Rev. Lett* 105,050405-1-4,2010 (DOI:10.1103/PhysRevLett.105.050405)
- [NICT-1] M. Koide and T. Ido: “Design of Monolithic Rectangular Cavity of 30-cm Length” *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 060209 ,2010 (DOI:10.1143/JJAP.49.060209)
- [NTT-1] Kensuke Inaba and Makoto Yamashita, “Thermodynamic properties of two-component fermionic atoms trapped in a two-dimensional optical lattice ”, *Physical Review A*, vol. 81, No. 6, pp. 063615-1-8, 2010 (DOI: 10.1103/PhysRevA.81.063615)
- [NTT-2] Kensuke Inaba and Makoto Yamashita, “Time-of-Flight Imaging Method to Observe Signatures of Antiferromagnetically Ordered States of Fermionic Atoms in an Optical Lattice”, *Physical Review Letters*, vol. 105, No. 17, pp. 173002-1-4, 2010 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.173002)
- [NTT-3] Kensuke Inaba, Shinya Miyatake, and Sei-ichiro Suga, “Mott transitions of three-component fermionic atoms with repulsive interaction in optical lattices”, *Physical Review A*, vol. 82, No. 5, pp.051602(R)-1-4, 2010 (DOI:10.1103/PhysRevA.82.051602)
- [NTT-4] Shinya Miyatake, Kensuke Inaba, and Sei-ichiro Suga, “Color-selective Mott transition and color superfluid of three-component fermionic atoms with repulsive interaction in optical lattices”, *Physica C*, vol. 470, S916–S918, 2010

(DOI:10.1016/j.physc.2009.11.162)

- [NTT-5]Keisuke Fujii and Yuuki Tokunaga, “Fault-Tolerant Topological One-Way Quantum Computation with Probabilistic Two-Qubit Gates”, Physical Review Letters, vol. 105, 250503-1-4 (2010) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.250503)
- [NTT-6]Kensuke Inaba and Sei-ichiro Suga, “Color Superfluid and Trionic State of Attractive Three-Component Lattice Fermionic Atoms at Finite Temperatures”, Modern Physics Letters B, “accepted”
- [NTT-7]Kensuke Inaba and Sei-ichiro Suga, “Three-component Repulsive Fermionic Atoms in Optical Lattices at Finite Temperatures”, Journal of Physics: Conference Series, 273, 012016 (2011) (DOI: 10.1088/1742-6596/273/1/012016)
- [NTT-8]Shinya Miyatake, Kensuke Inaba, and Sei-ichiro Suga, “Color superfluidity and trionic state of three-component lattice fermionic atoms”, Journal of Physics: Conference Series, 273, 012008 (2011) (DOI: 10.1088/1742-6596/273/1/012008)
- [NTT-9] Hitoshi Yoshizumi, Kensuke Inaba, Tomoko Kita, and Sei-ichiro Suga, “Two-orbital Kondo effect in a quantum dot coupled to ferromagnetic leads”, Phys. Rev. B, “accepted”

#### (4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)